

INFLUÊNCIA DA PERCENTAGEM E ORIENTAÇÃO DE LAMINADOS DE CFRP NO REFORÇO AO CORTE DE VIGAS DE BETÃO ARMADO

Influence of percentage and inclination of the CFRP laminates in the shear strengthening of RC beams

Salvador Dias (1); Joaquim Barros (2)

(1) Assistente, Departamento de Engenharia Civil
Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Portugal
email: sdias@civil.uminho.pt

(2) Professor Associado, Departamento de Engenharia Civil
Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Portugal
email: barros@civil.uminho.pt

*Escola de Engenharia da Universidade do Minho
Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães Portugal*

Resumo

Para avaliar a influência da percentagem e orientação de laminados de CFRP, aplicados segundo a técnica NSM, no reforço ao corte de vigas de betão armado de secção em T, foi efectuado um programa experimental. Foram analisadas três orientações para os laminados (vertical, inclinado a 45° e a 60°) e, para cada uma destas orientações, foram consideradas três percentagens de CFRP. Com o objectivo de simular situações próximas dos cenários reais no reforço estrutural, todas as vigas onde foi aplicado CFRP continham uma determinada percentagem de estribos. Os resultados obtidos são apresentados e analisados.

Palavras-Chave: Reforço ao corte, CFRP, laminados inseridos

Abstract

To assess the influence of the percentage and inclination of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) laminates, applied according to the Near Surface Mounted (NSM) technique, for the shear strengthening of T cross section RC beams, series of three point bending tests were carried out. Three inclinations for the laminates (vertical, and at 45° and 60° with the beam axis) were considered and, for each one, three CFRP percentages were analyzed. With the purpose of simulating practical situations, the strengthened beams had a certain percentage of steel stirrups. The experimental program is described and the obtained results are presented and analyzed.

Keywords: Shear strengthening, CFRP, Near Surface Mounted

1 Introdução

O sucesso de uma técnica de reforço estrutural está directamente associado às propriedades dos materiais que utiliza, quer em termos mecânicos como de durabilidade; às alterações que introduz na arquitectura das construções; e à viabilidade económica onde devem ser tidos em conta o preço dos materiais, a simplicidade e a rapidez de execução do reforço, os custos afectos à perturbação das actividades a que a estrutura se destina, e os custos de manutenção após a estrutura reforçada entrar em serviço. É neste contexto que nos dias de hoje é unanimemente aceite que as técnicas de reforço com CFRP proporcionam soluções globalmente tão ou mais eficazes que as técnicas de reforço tradicionais (encamisamento das secções, colagem de elementos metálicos, aplicação de pré-esforço exterior).

A rotura por corte deve ser evitada em qualquer elemento estrutural de betão armado por se tratar de uma rotura frágil e quase instantânea. A necessidade de uma intervenção de reforço ao corte de um determinado elemento estrutural pode ser provocada por várias razões (mudança do tipo de utilização, erros de projecto e/ou de construção, redução da resistência dos materiais resultante da sua degradação, alterações nos códigos de dimensionamento com a introdução de prescrições mais severas e ocorrência de acidentes). Além disso, refira-se também os casos de elementos estruturais que, posteriormente a uma operação de reforço à flexão, o seu modo de rotura passa a ser por corte. Assim, o reforço à flexão pode conduzir à necessidade de se proceder a reforço ao esforço transversal.

O comportamento de elementos de betão armado com rotura por corte é, por si só, um fenómeno de análise complexa, devido aos vários parâmetros que lhe estão intrínsecos, como por exemplo: geometria do elemento, tipo de carregamento, percentagem de estribos, percentagem da armadura longitudinal e resistência do betão. Em elementos reforçados ao corte com CFRP novos aspectos associados ao CFRP aumentam a complexidade do fenómeno do corte em vigas de betão armado (Bousselham e Chaallal, 2004). Exemplos disto são os seguintes factos:

- i) enquanto os estribos fazem parte de uma estrutura monolítica os CFRP são colados, ou seja, é introduzida uma nova variável que está associada à questão da resistência da ligação colada betão/CFRP (aderência na interface betão/CFRP);
- ii) os materiais compósitos de CFRP têm um comportamento linear à tracção até à sua rotura violenta, o que não acontece com o aço das armaduras que tem um comportamento elasto-plástico após a sua cedência;
- iii) o princípio básico do reforço ao corte com CFRP é a colocação deste com as fibras orientadas transversalmente ao eixo da peça ou segundo a normal às potenciais fendas de corte (Khalifa, 1999). Para tal, existem vários tipos de produtos de CFRP e várias configurações de reforço em termos de superfície colada, distribuição do CFRP, orientação das fibras, sobreposição de camadas com orientações diferentes e adopção de mecanismos exteriores de fixação. Além disso, existe mais do que uma técnica de aplicação do reforço de CFRP. Uma consequência desta variedade de soluções é o aumento do número de parâmetros que influenciam o comportamento estrutural dos elementos reforçados ao corte com CFRP.

A investigação realizada até ao momento, no que diz respeito ao reforço ao corte com CFRP de vigas de betão armado, tem-se centrado em duas técnicas de reforço: a da colagem externa de mantas, tecidos ou laminados de CFRP (uma síntese de vários trabalhos experimentais já realizados pode ser lida em Bousselham e Chaallal (2004)), que foi a primeira a ser testada, e a da inserção de varões (De Lorenzis (2002)) ou laminados de CFRP (Dias e Barros (2004-b)) em entalhes efectuadas no betão de recobrimento das faces laterais das vigas. A primeira é designada na literatura

internacional por “*Externally Bonded Reinforcement*” (EBR) e a segunda por “*Near Surface Mounted*” (NSM). Mais informações sobre estas técnicas de reforço e sobre outros aspectos anteriormente referidos podem ser obtidas em Dias e Barros (2004-a). Relativamente à técnica NSM, com laminados de CFRP, foi já efectuada a sua validação por comparação directa com a técnica EBR (Dias e Barros (2004-b)). Posteriormente à referida validação, tornou-se necessário efectuar uma avaliação experimental sobre o efeito dos vários parâmetros que podem influenciar o comportamento de uma viga de betão armado reforçada ao corte usando a técnica NSM com laminados de CFRP. Na próxima secção será apresentado um programa experimental com vigas T de betão armado em que a percentagem e orientação de CFRP foram os parâmetros avaliados.

2 Programa experimental

2.1 Concepção dos modelos

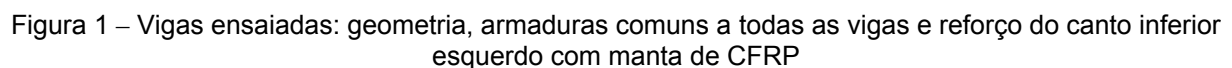
O programa experimental realizado envolveu a concepção de doze modelos de vigas de betão armado de secção transversal em T com as dimensões apresentadas na Figura 1. O pré-dimensionamento das vigas ensaiadas foi efectuada por forma a que o seu modo de rotura fosse por corte. Assim, e com o objectivo de circunscrever a zona de rotura das vigas, os ensaios foram efectuados sob três pontos de carga e com vãos de corte diferentes ($a = 900$ mm e $b = 1350$ mm, ou seja, $b/a = 1.5$), de acordo com o representado na Figura 1. As vigas tinham um vão de corte (a) igual a duas vezes e meia a altura útil da secção ($a/d = 2.5$). As vigas ensaiadas continham, longitudinalmente na face traccionada, três varões de 25 mm de diâmetro ($3\phi 25$) e dois varões de 16 mm de diâmetro ($2\phi 16$) colocados de acordo com a disposição representada na Figura 1. Em todas as vigas utilizou-se a mesma armadura no banzo: longitudinalmente $6\phi 12$ e transversalmente estribos de 6 mm de diâmetro, afastados de 150 mm ($\phi 6@150$ mm) no vão de corte (a) e afastados de 75 mm ($\phi 6@75$ mm) no vão de corte (b). De forma a evitar que a rotura por corte ocorresse no maior vão de corte (b), em todas as vigas foram colocados, no referido vão de corte, estribos $\phi 6@75$ mm. Assim, as diferenças existentes entre modelos ficaram circunscritas ao menor vão de corte (a).

O programa experimental englobou quatro tipos de vigas, diferenciadas pela forma como foi garantida a resistência ao esforço transversal no menor dos vãos de corte (a). Assim, além de uma viga sem qualquer reforço ao corte, foram ensaiadas vigas com duas distintas percentagens de estribos de aço: uma com estribos $\phi 6@300$ mm e a outra com estribos $\phi 6@130$ mm. Para a primeira das referidas percentagens de armadura transversal ($\phi 6@300$ mm) consideraram-se modelos com e sem reforço ao corte de CFRP, tendo este sido executado usando a técnica NSM com laminados de CFRP. Foram analisadas três percentagens distintas de CFRP e, para cada umas destas percentagens, foram estudadas três formas de configuração de reforço ao corte em termos de orientação do CFRP: laminados de CFRP inseridos em entalhes verticais (90°), inclinados a 45° e inclinados a 60° . Os ângulos de 90° , 45° e 60° referem-se ao ângulo que a direcção das fibras do CFRP faz com a direcção do eixo da viga.

O pré-dimensionamento dos modelos ensaiados foi efectuada de forma a tentar garantir a rotura por corte e, para o caso dos modelos reforçados com a quantidade máxima de CFRP, independentemente do tipo de orientação dos laminados, que tivessem uma capacidade de carga semelhante à da viga de betão armado com a maior percentagem de estribos de aço considerada ($\phi 6@130$ mm no menor vão de corte (a)). Estas condições traduziram-se nas seguintes soluções de reforço com CFRP e que foram executadas no menor vão de corte (a): oito laminados em cada face da viga, para os casos dos reforços

Na Tabela 1 e nas Figuras 1 e 2 apresentam-se os dados relativos às vigas ensaiadas. Para evitar a ocorrência do destacamento do betão de recobrimento no apoio mais solicitado, este canto foi reforçado localmente com três camadas de manta de CFRP unidireccional, ficando as fibras dispostas segundo a direcção do eixo da viga (ver Figura 1). A distribuição dos laminados de CFRP ao longo do vão de corte a reforçar foi efectuada usando o princípio ilustrado na Figura 3, que está aplicado ao caso do modelo 2S-8LV. A quantidade de laminados resultante do pré-dimensionamento foi distribuída ao longo da linha BC representada na Figura 3. O ponto B foi obtido por se ter admitido uma degradação da carga com uma inclinação de 45° .

Vigas	Idade à data do ensaio (dias)	Sistema de reforço ao corte no menor vão de corte (a)			
		Material	Quantidade	Espaçamento (mm)	Ângulo (°)
C-R	65	-	-	-	-
2S-R	61	Estribos de aço	2φ6 (2 ramos)	300	90
6S-R	62	Estribos de aço	6φ6 (2 ramos)	130	90
2S-3LV	72	Estribos de aço	2φ6 (2 ramos)	300	90
		Laminados de CFRP	2x3 laminados (1.4x10 mm ²)	267	90
2S-5LV	71	Estribos de aço	2φ6 (2 ramos)	300	90
		Laminados de CFRP	2x5 laminados (1.4x10 mm ²)	160	90
2S-8LV	70	Estribos de aço	2φ6 (2 ramos)	300	90
		Laminados de CFRP	2x8 laminados (1.4x10 mm ²)	100	90
2S-3LI45	66	Estribos de aço	2φ6 (2 ramos)	300	90
		Laminados de CFRP	2x3 laminados (1.4x10 mm ²)	367	45
2S-5LI45	64	Estribos de aço	2φ6 (2 ramos)	300	90
		Laminados de CFRP	2x5 laminados (1.4x10 mm ²)	220	45
2S-8LI45	68	Estribos de aço	2φ6 (2 ramos)	300	90
		Laminados de CFRP	2x8 laminados (1.4x10 mm ²)	138	45
2S-3LI60	71	Estribos de aço	2φ6 (2 ramos)	300	90
		Laminados de CFRP	2x3 laminados (1.4x10 mm ²)	325	60
2S-5LI60	67	Estribos de aço	2φ6 (2 ramos)	300	90
		Laminados de CFRP	2x5 laminados (1.4x10 mm ²)	195	60
2S-7LI60	68	Estribos de aço	2φ6 (2 ramos)	300	90
		Laminados de CFRP	2x7 laminados (1.4x10 mm ²)	139	60



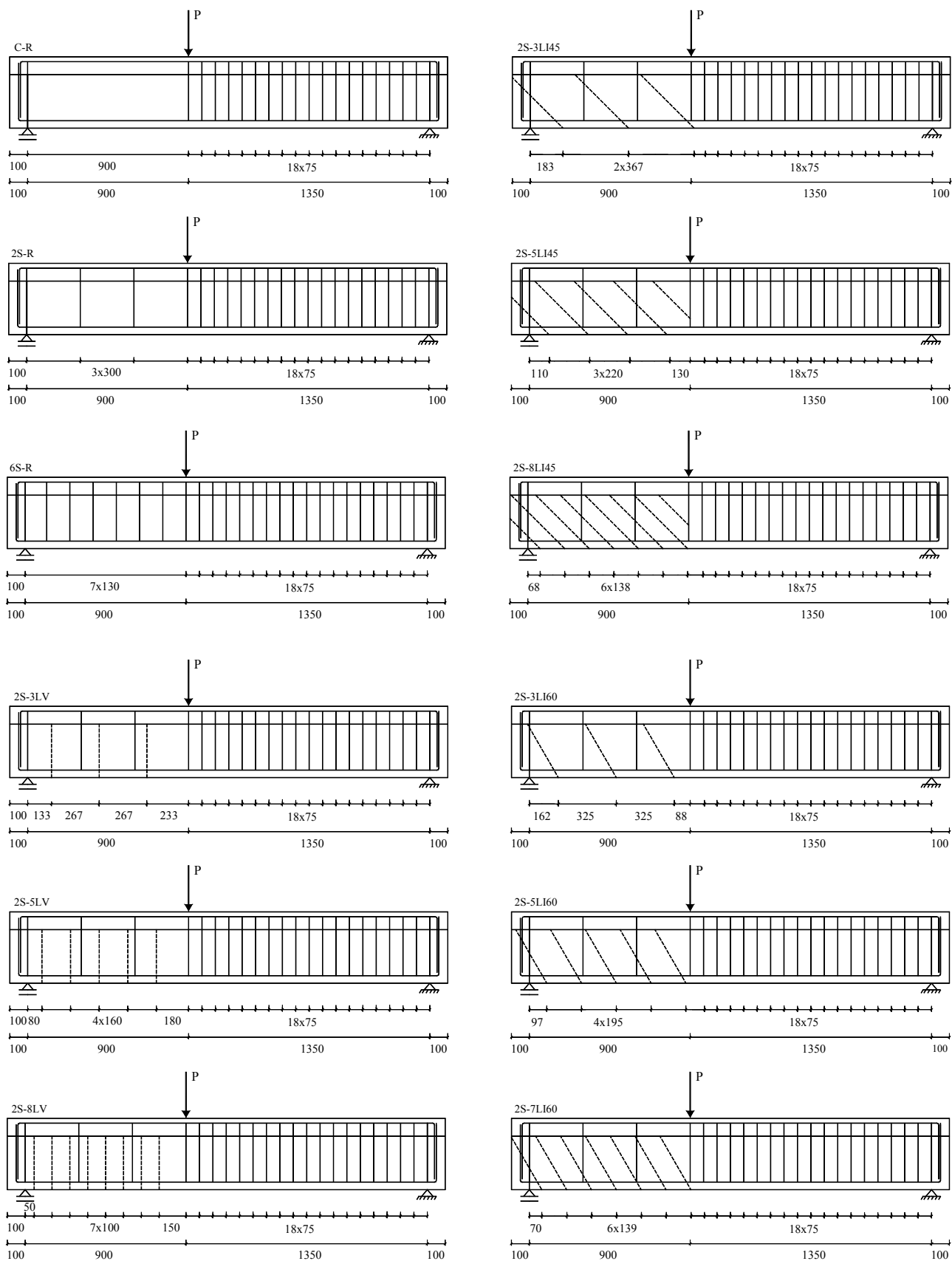


Figura 2 – Vigas ensaiadas: localização das armaduras transversais (linha a traço cheio) e dos laminados de CFRP (linha a tracejado) no reforço ao corte

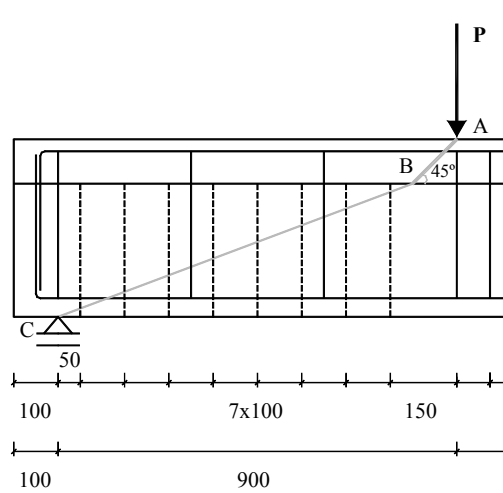


Figura 3 – Critério de posicionamento do reforço de CFRP

2.2 Caracterização dos materiais

A avaliação da resistência à compressão do betão foi efectuada experimentalmente aos 28 dias e à data da realização dos ensaios das vigas. Para tal, ensaiaram-se à compressão cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, segundo o estipulado na NP-ENV206 (1993). Nas vigas ensaiadas utilizaram-se armaduras de varões de aço nervurado de 6 mm, 12 mm, 16 mm e de 25 mm de diâmetro, cujas principais propriedades foram avaliadas experimentalmente por intermédio de ensaios de tracção uniaxial efectuados seguindo a EN10002 (1990). A caracterização dos laminados de CFRP utilizados (S&P Laminates CFK 150/2000, S&P (2002)) foi efectuada por intermédio da realização de ensaios de tracção uniaxial, segundo a ISO 527-5 (1997). Na Tabela 2 estão registados os valores médios, obtidos experimentalmente, das propriedades mecânicas mais significativas do betão, dos aços e dos laminados de CFRP utilizados. O adesivo utilizado para a fixação dos laminados foi o MBrace Resin 220 (DEGUSSA (2003)). A manta de CFRP utilizada no reforço do canto inferior das vigas tem a designação comercial S&P C-Sheet 240 - 300 gr/m² (S&P (2002)) e para a sua aplicação utilizou-se o primário MBrace Resin 50 (DEGUSSA (2003)) e a resina MBrace Resin 55 (DEGUSSA (2003)).

Tabela 2 – Propriedades dos materiais avaliadas experimentalmente (betão, aço e laminados de CFRP).

Betão	Resistência à compressão				
	$f_{cm} = 26.0$ MPa (aos 28 dias de idade)		$f_{cm} = 31.1$ MPa (aos 70 dias - data do ensaio das vigas)		
Aço	Tensão	$\phi 6$	$\phi 12$	$\phi 16$	$\phi 25$
	f_{sym} *	533 MPa	446 MPa	447 MPa	444 MPa
	f_{sum} **	592 MPa	564 MPa	561 MPa	574 MPa
Laminados de CFRP	Resistência à tracção	Módulo de elasticidade	Extensão máxima ***	Espessura	
	$f_{fum} = 2592$ MPa **	$E_{fm} = 166.6$ GPa	$\epsilon_{fum} = 17.7$ ‰	1.4 mm	

* Valor médio da tensão de cedência; ** Valor médio da tensão máxima; *** Obtido pela lei de Hooke.

2.3 Aplicação do reforço de CFRP

Os laminados de CFRP, com secção transversal de 1.4×10 mm², foram inseridos em entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais da alma das vigas. Os entalhes, com cerca de 5 mm de largura e 15 mm de profundidade, foram executados

com um equipamento que dispõe de um disco de corte e dispositivos de ajuste da profundidade e do alinhamento do entalhe. Após a abertura dos entalhes, procedeu-se à sua limpeza por intermédio da aplicação de jactos de ar. Nas vigas que continham estribos de aço, o betão de recobrimento destes tinha espessura de cerca de 22 mm, tendo-se assegurado que nenhum estribo foi danificado pela abertura dos entalhes. Os laminados de CFRP, fornecidos em rolos de 150 m, foram cortados com o comprimento desejado e, posteriormente, foram limpos com um desengordurante. A fixação dos laminados de CFRP foi efectuada por intermédio de um adesivo epoxídico. Primeiro, o entalhe foi preenchido com adesivo e, depois, o laminado, também com adesivo aplicado nas superfícies laterais, foi inserido no entalhe. A operação de reforço termina com remoção do adesivo em excesso e a execução do acabamento final. Na Figura 4 ilustram-se algumas das fases da aplicação do reforço.



Abertura de entalhes com a direcção e a profundidade desejada



Após a colocação do adesivo no entalhe e no laminado procede-se à inserção do laminado de CFRP no entalhe



Remoção do adesivo em excesso e execução do acabamento

Figura 4 – Fases de aplicação do reforço de CFRP usando a técnica NSM com laminados de CFRP

2.4 Sistema de ensaio

As vigas foram submetidas a três pontos de carga até à sua rotura, de acordo com o representado na Figura 1. Os ensaios foram controlados por intermédio de um transdutor de deslocamento (LVDT) colocado na secção de aplicação da carga, tendo-se utilizado uma velocidade de deslocamento de 0.01 mm/s.

3 Apresentação e análise dos resultados

3.1 Comportamento em serviço e na rotura

Na Tabela 3 apresentam-se, para cada um dos modelos de viga ensaiados, os valores registados para a carga de serviço ($F_{l/400}$) e para a carga total máxima (F_{max}). A carga de serviço foi definida como sendo a carga correspondente a uma flecha na secção de aplicação da carga de valor igual a $l/400$, em que l é o vão livre da viga. Como as vigas ensaiadas tinham um vão livre igual a 2.25 m, a carga de serviço ($F_{l/400}$) é a carga correspondente a uma flecha de 5.625 mm. Atribuindo as designações $F_{l/400}^{2S-R}$ e $F_{l/400}^{6S-R}$ à carga de serviço registada nas vigas de referência contento, respectivamente, a menor (viga 2S-R: $\phi 6@300mm$) e a maior (viga 6S-R: $\phi 6@130mm$) percentagem de armadura transversal, determinaram-se os factores $F_{l/400}/F_{l/400}^{2S-R}$ e $F_{l/400}/F_{l/400}^{6S-R}$ indicados na Tabela 3. Este princípio foi também aplicado em termos de carga máxima (F_{max}), tendo sido determinados os factores F_{max}/F_{max}^{2S-R} e F_{max}/F_{max}^{6S-R} indicados na Tabela 3. F_{max}^{2S-R} e F_{max}^{6S-R} são os valores da carga máxima registada nas vigas 2S-R e 6S-R,

respectivamente. Na Tabela 3 apresentam-se também, para cada um dos modelos ensaiados, os valores registados para a flecha na secção de aplicação da carga correspondente à carga F_{max} (δ_{max}). Atribuindo as designações δ_{max}^{2S-R} e δ_{max}^{6S-R} ao valor da referida flecha registado nas vigas de referência conteúdo, respectivamente, a menor (viga 2S-R: $\phi 6@300\text{mm}$) e a maior (viga 6S-R: $\phi 6@130\text{mm}$) percentagem de armadura transversal, respectivamente, determinaram-se os factores $\delta_{max}/\delta_{max}^{2S-R}$ e $\delta_{max}/\delta_{max}^{6S-R}$ indicados na Tabela 3.

As respostas carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga das várias vigas ensaiadas estão apresentadas nas Figuras 5 a 8. Estas respostas traduzem o comportamento das referidas vigas até ao momento em que começaram a perder capacidade de carga, posteriormente, a terem atingido a sua capacidade máxima resistente.

Tabela 3 – Comportamento em serviço e na rotura.

Vigas	$F_{l/400}$ (kN)	$F_{l/400}/F_{l/400}^{2S-R}$	$F_{l/400}/F_{l/400}^{6S-R}$	F_{max} (kN)	F_{max}/F_{max}^{2S-R}	F_{max}/F_{max}^{6S-R}	δ_{max} (mm)	$\delta_{max}/\delta_{max}^{2S-R}$	$\delta_{max}/\delta_{max}^{6S-R}$
C-R	*	-	-	243	0.77	0.59	5.18	0.87	0.70
2S-R	311	1.00	0.84	315	1.00	0.77	5.97	1.00	0.81
6S-R	372	1.20	1.00	410	1.30	1.00	7.4	1.24	1.00
2S-3LV	*	-	-	316	1.00	0.77	4.94	0.83	0.67
2S-5LV	328	1.05	0.88	357	1.13	0.87	7.11	1.19	0.96
2S-8LV	387	1.24	1.04	396	1.26	0.97	6.22	1.04	0.84
2S-3LI45	327	1.05	0.88	328	1.04	0.80	5.73	0.96	0.77
2S-5LI45	378	1.22	1.02	384	1.22	0.94	5.92	0.99	0.80
2S-8LI45	*	-	-	382	1.21	0.93	5.07	0.85	0.69
2S-3LI60	369	1.19	0.99	374	1.19	0.91	5.78	0.97	0.78
2S-5LI60	382	1.23	1.03	392	1.24	0.96	5.93	0.99	0.80
2S-7LI60	403	1.30	1.08	406	1.29	0.99	5.86	0.98	0.79

* A flecha correspondente a $l/400=5.625$ mm só foi atingida após F_{max} .

Em termos de carga de serviço ($F_{l/400}$), independentemente da percentagem de CFRP, a orientação dos laminados a 60° foi a mais eficaz, pois proporcionou, relativamente à viga de referência 2S-R, um aumento médio da carga de serviço de 24%, enquanto nas soluções com laminados verticais e inclinados a 45° o referido aumento médio foi de 15% e 14%, respectivamente. Assim, sendo a carga de serviço ($F_{l/400}$) aquela para a qual a flecha na secção de aplicação da carga vale $l/400$, verifica-se que em termos médios o reforço de CFRP proporcionou um acréscimo de rigidez em serviço das vigas. A solução de reforço que proporcionou a maior carga de serviço, de entre as vigas ensaiadas, foi a referente à viga 2S-7LI60, onde a quantidade e disposição dos laminados de CFRP garantiram uma carga de serviço 30% superior à da viga sem reforço de CFRP (viga 2S-R). Para o caso do reforço inserido em entalhes verticais, também foi a viga com a maior

percentagem de CFRP que originou a maior carga de serviço (24% superior à da viga 2S-R sem reforço de CFRP). O mesmo não se passou no reforço com laminados inclinados a 45°, onde foi a solução referente à percentagem intermédia de CFRP (viga 2S-5LI45) que garantiu a maior carga de serviço (22% superior à da viga 2S-R sem reforço de CFRP). Comparando as duas soluções de betão armado contendo apenas estribos de aço como elementos resistentes ao esforço transversal (sem CFRP) constata-se que a carga de serviço da viga 6S-R foi 20% superior à registada pela viga 2S-R. Assim, verifica-se que, das soluções equivalentes à viga 6S-R em termos de capacidade máxima de carga (vigas reforçadas com a percentagem máxima de CFRP), apenas a solução com laminados inclinados a 45° é que não conseguiu superar o acréscimo de carga de serviço proporcionado pela solução de reforço ao corte da viga 6S-R. Neste aspecto destaca-se a solução de sete laminados inclinados a 60° em cada uma das faces da viga (viga 2S-7LI60) que garantiu um aumento da carga de serviço 8% superior ao proporcionado pela solução de reforço ao corte da viga 6S-R. Registe-se ainda o facto das soluções de cinco laminados inclinados a 45° e de cinco laminados inclinados a 60° terem proporcionado valores da relação $F_{l/400} / F_{l/400}^{6S-R}$ superiores à unidade, respectivamente, 1.02 e 1.03.

Tendo por base a capacidade de carga máxima da viga reforçada com $\phi 6@300\text{mm}$ (viga 2S-R) verificou-se que a aplicação de estribos $\phi 6@130\text{mm}$ (viga 6S-R) proporcionou um acréscimo de carga na rotura de 30%. Relativamente à carga máxima da viga C-R (sem estribos de aço e sem CFRP), a distribuição de estribos adoptada para o menor dos vãos de corte da viga 6S-R e da viga 2S-R proporcionou um aumento de capacidade de carga de 69% e 30%, respectivamente (ver Figura 5). Tendo por base de comparação a carga de rotura registada na viga de referência 2S-R, os valores da Tabela 3 indicam que a presença dos laminados de CFRP no reforço ao corte, independentemente da percentagem e orientação do reforço de CFRP, proporcionou um aumento da capacidade de carga das vigas (ver Figuras 6, 7 e 8). As soluções com a menor percentagem de CFRP (maior espaçamento entre os laminados) foram as que conduziram a menores ganhos de capacidade de carga máxima: 0%, 4% e 19%, respectivamente, para a solução de laminados verticais, inclinados a 45° e inclinados a 60°. A ordem do grau de eficácia das três orientações dos laminados registada na menor percentagem de CFRP manteve-se para a percentagem intermédia de CFRP. Com efeito, o reforço com laminados verticais, inclinados a 45° e inclinados a 60° garantiu, relativamente à carga máxima da viga 2S-R, um aumento de 13%, 22% e 24%, respectivamente. Das vigas reforçadas com a maior percentagem de CFRP, a solução com laminados inclinados a 60°, tal como aconteceu nas restantes percentagens, foi a mais eficaz, garantindo, relativamente à carga máxima da viga 2S-R, um aumento de 29%, enquanto as soluções com laminados verticais e inclinados a 45° garantiram um aumento de 26% e 21%, respectivamente. Conforme foi referido anteriormente, as vigas reforçadas com a maior percentagem de CFRP foram concebidas de forma a terem uma capacidade de carga semelhante à da viga de referência 6S-R. Os resultados demonstram que esse objectivo foi, de um modo geral, atingido uma vez que a capacidade de carga máxima da viga reforçada com a maior percentagem de laminados verticais, inclinados a 45° e inclinados a 60° foi, respectivamente, 97%, 93% e 99% da atingida pela viga 6S-R. Em relação às vigas reforçadas com a percentagem intermédia de CFRP, as soluções com laminados verticais, inclinados a 45° e inclinados a 60° tiveram uma capacidade de carga máxima, respectivamente, 87%, 94% e 96% da carga máxima da viga 6S-R. Uma referência também para a solução de reforço com os laminados inclinados a 60° com a menor percentagem de CFRP, uma vez que garantiu uma capacidade de carga da viga (2S-3LI60) igual a 91% da capacidade máxima de carga da viga 6S-R.

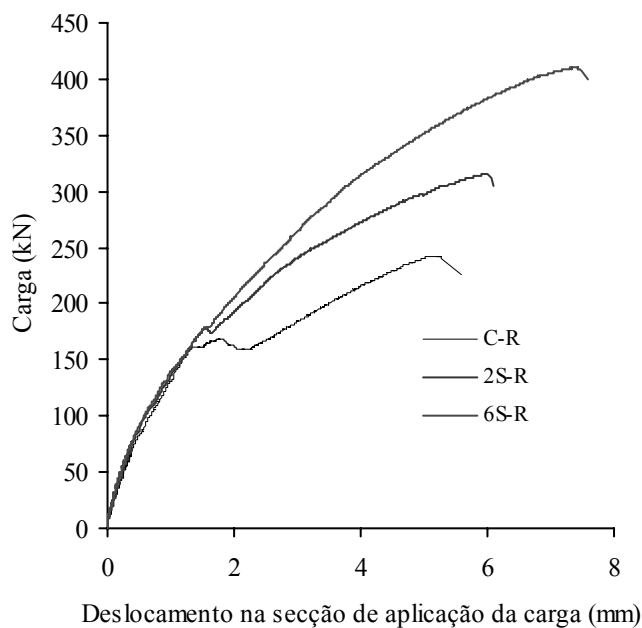


Figura 5 – Curvas carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga das vigas de referência (sem reforço de CFRP)

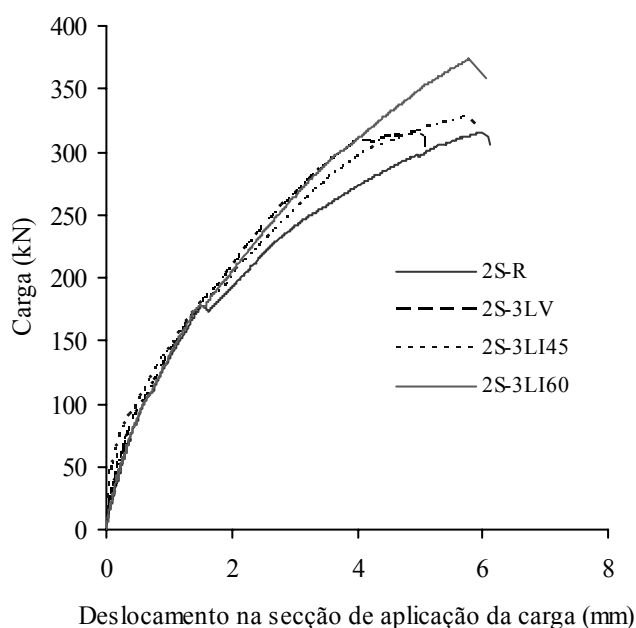


Figura 6 – Curvas carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga das vigas com a menor percentagem de CFRP e da viga sem reforço 2S-R

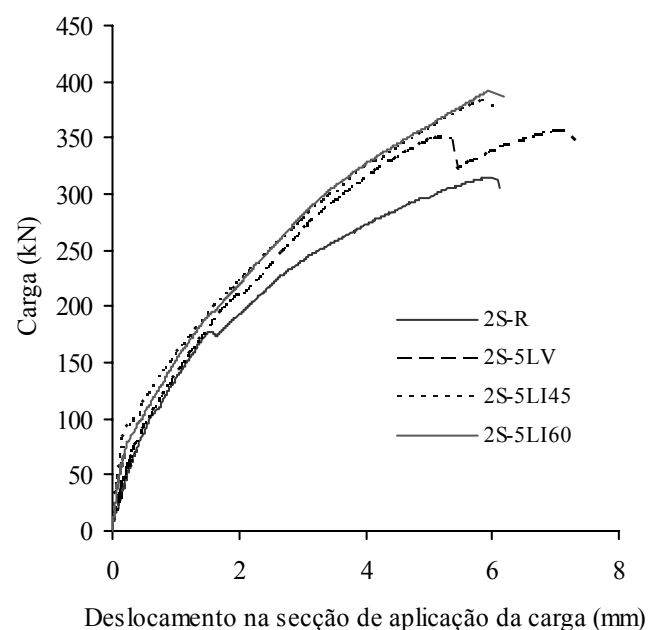


Figura 7 – Curvas carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga das vigas com a percentagem intermédia de CFRP e da viga sem reforço 2S-R

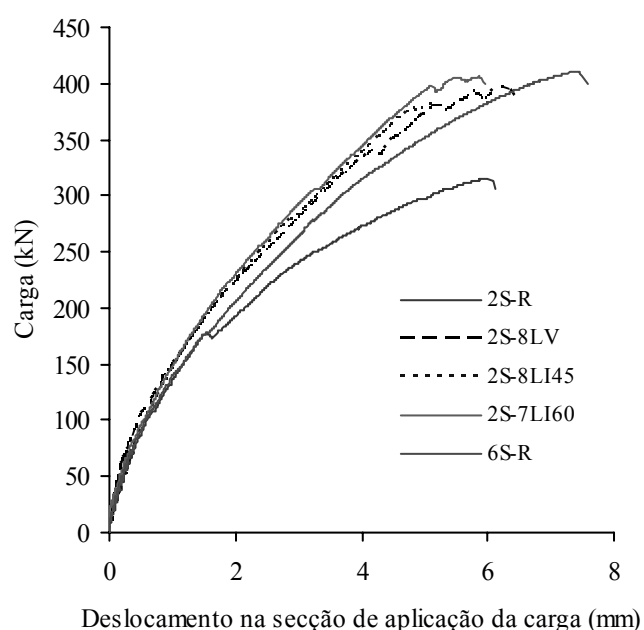


Figura 8 – Curvas carga vs deslocamento na secção de aplicação da carga das vigas com a maior percentagem de CFRP e das vigas 2S-R e 6S-R

De um modo geral é possível verificar, por comparação do valor da flecha δ_{max} das vigas reforçadas com CFRP com o valor da flecha δ_{max}^{2S-R} da viga 2S-R, que a capacidade deformacional na rotura não foi sensível à presença do reforço ao corte de CFRP. As exceções foram os casos das vigas 2S-3LV e 2S-8LI45 que registaram valores da flecha δ_{max} mais baixos do que a verificada na viga 2S-R (δ_{max}^{2S-R}). A menor capacidade de deformação na rotura verificada nas vigas reforçadas com CFRP pode ser constatada

analisando os valores do factor $\delta_{max} / \delta_{max}^{6S-R}$. Com efeito, é possível verificar que, exceptuando o caso da viga 2S-5LV que teve uma flecha máxima δ_{max} semelhante à registada na viga 6S-R (δ_{max}^{6S-R}), as vigas reforçadas com CFRP registaram na rotura uma flecha na secção de aplicação da carga (δ_{max}) entre os 67% a 84% da verificada na viga 6S-R (δ_{max}^{6S-R}). Comparando directamente os modelos que continham a maior percentagem de CFRP (vigas 2S-8LV, 2S-8LI45 e 2S-7LI60) com o modelo “equivalente” em betão armado (viga 6S-R) é possível constatar que este apresenta uma capacidade deformacional, em média, 30% superior (ver Figura 8).

Como era esperado, a rotura por corte acabou por se registar em todas as vigas ensaiadas, tendo ocorrido no menor dos vãos de corte. Na Figura 9 apresentam-se pormenores da zona de rotura das doze vigas ensaiadas (os estribos existentes no menor vão de corte de cada uma das vigas estão assinalados por rectas verticais - ver também Figura 2).

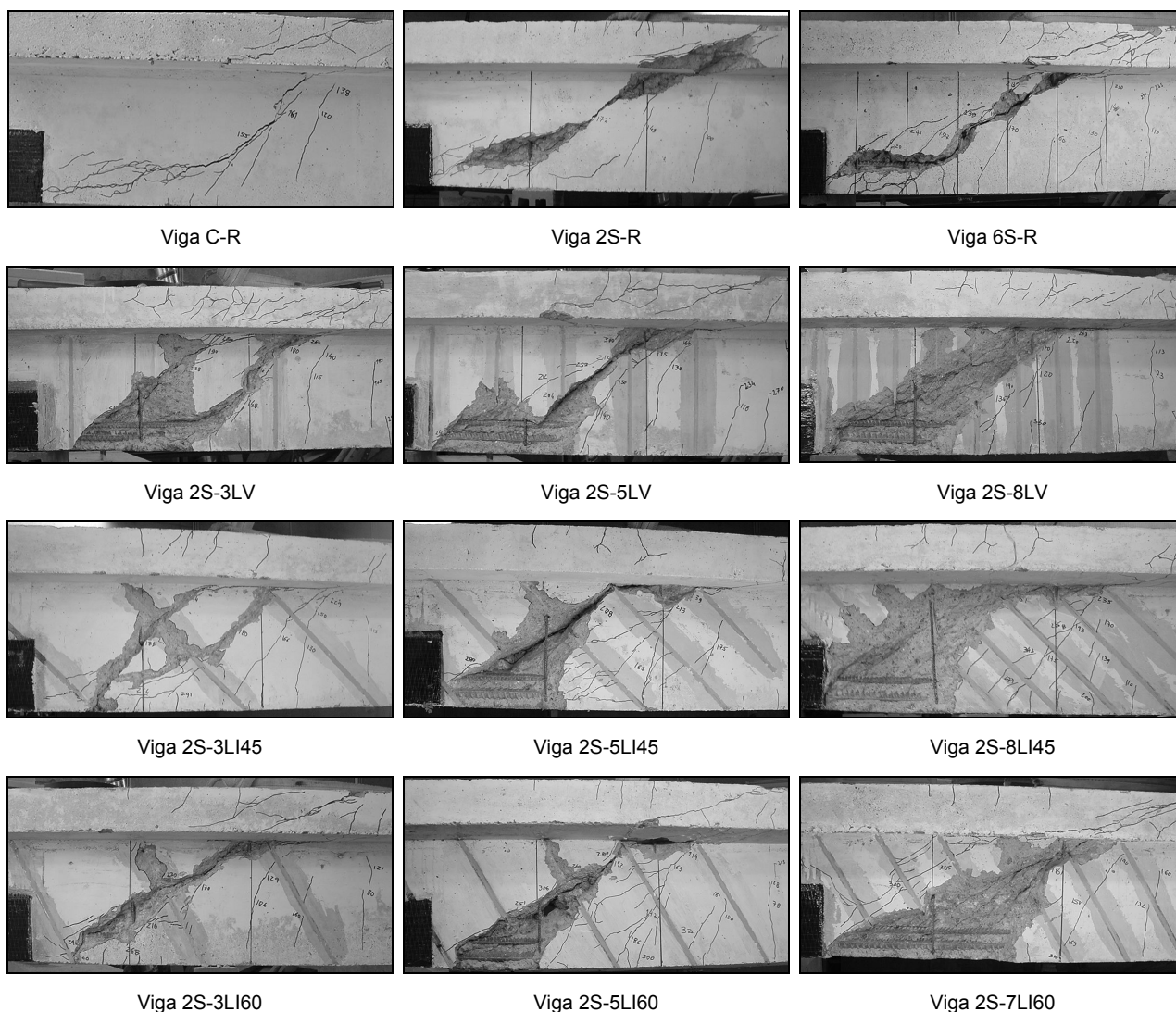


Figura 9 – Pormenorização da zona de rotura das vigas ensaiadas

3.2 Contribuição dos vários materiais na resistência ao esforço transversal

No menor vão de corte, o valor do esforço transversal resistente de cada uma das vigas ensaiadas é de (ver Figura 1):

$$V_r = 0.6F_{max} \quad (\text{Equação 1})$$

em que F_{max} é o valor da força máxima registada em cada viga (Tabela 3).

Adoptando, para o caso das vigas de betão armado reforçadas ao corte com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento, o mesmo princípio que é utilizado nos códigos de dimensionamento para quantificação da parcela resistente ao esforço transversal de uma viga de betão armado, tem-se:

$$V_r = V_c + V_s + V_f \quad (\text{Equação 2})$$

ou seja, às contribuições do betão (V_c) e dos estribos de aço (V_s) é adicionada a contribuição do CFRP no reforço ao corte (V_f).

Na Tabela 4 apresentam-se, para as vigas ensaiadas, o valor de V_r e das respectivas componentes presentes na equação (2). Relativamente a estas, a Figura 10 ilustra o “peso” da contribuição de cada um dos materiais no valor de V_r . Refira-se que a contribuição do betão (V_c) foi obtida por intermédio do resultado da viga C-R, enquanto nas vigas com CFRP a contribuição dos estribos de aço (V_s) foi obtida por intermédio do resultado da viga 2S-R.

Tabela 4 – Contribuição dos vários materiais na resistência ao esforço transversal.

Vigas	Reforço ao corte em cada uma das faces do menor dos vãos de corte das vigas	V_r (kN)	V_c (kN)	V_s (kN)	V_f (kN)	Ganho de resistência do CFRP (%)
C-R	-	145.8	145.8	-	-	-
2S-R	Dois estribos de aço	189	145.8	43.2	-	-
6S-R	Seis estribos de aço	246	145.8	100.2	-	-
2S-3LV	Dois estribos de aço + três laminados verticais	189.6	145.8	43.2	0.6	0.3
2S-5LV	Dois estribos de aço + cinco laminados verticais	214.2	145.8	43.2	25.2	13.3
2S-8LV	Dois estribos de aço + oito laminados verticais	237.6	145.8	43.2	48.6	25.7
2S-3LI45	Dois estribos de aço + três laminados inclinados a 45°	196.8	145.8	43.2	7.8	4.1
2S-5LI45	Dois estribos de aço + cinco laminados inclinados a 45°	230.4	145.8	43.2	41.4	21.9
2S-8LI45	Dois estribos de aço + oito laminados inclinados a 45°	229.2	145.8	43.2	40.2	21.3
2S-3LI60	Dois estribos de aço + três laminados inclinados a 60°	224.4	145.8	43.2	35.4	18.7
2S-5LI60	Dois estribos de aço + cinco laminados inclinados a 60°	235.2	145.8	43.2	46.2	24.4
2S-7LI60	Dois estribos de aço + sete laminados inclinados a 60°	243.6	145.8	43.2	54.6	28.9

Da análise dos dados da Tabela 4 e da Figura 10 é possível verificar os seguintes pontos:

- o contributo do betão destacou-se do contributo dos restantes materiais;
- o contributo, em termos de resistência ao esforço transversal, proporcionado pela colocação de dois estribos de aço no menor vão de corte e sem CFRP (viga 2S-R) foi de 43.2 kN. A passagem de dois estribos (viga 2S-R) para seis estribos de aço (viga 6S-R) permitiu que o referido contributo fosse de 100.2 kN. Este aumento não foi proporcional ao aumento da percentagem de estribos.

iii) a solução de reforço de CFRP que garantiu, relativamente à viga 2S-R, um acréscimo de resistência ao esforço transversal semelhante ao da solução da viga 6S-R ($100.2 - 43.2 = 57$ kN) foi a da viga 2S-7LI60 (54.6 kN). A capacidade resistente ao corte conferida pelo reforço da viga 2S-8LV (48.6 kN) foi 85% do garantido pela viga 6S-R. As soluções de reforço de CFRP das vigas referidas, conjuntamente, com as das vigas 2S-5LI45, 2S-8LI45 e 2S-5LI60, garantiram contributos superiores a 70% do garantido pelo reforço em estribos de aço colocado na viga 6S-R. O contributo do CFRP nas vigas 2S-3LV e 2S-3LI45 foi bastante baixo.

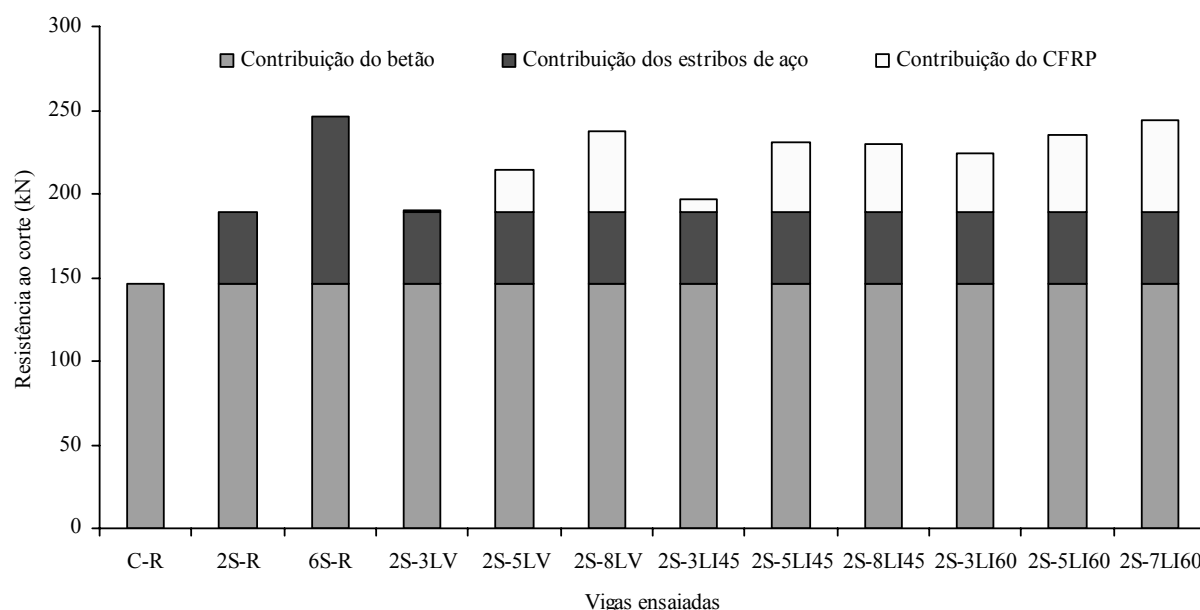


Figura 10 – Contributo dos vários materiais para a resistência ao esforço transversal

3.3 Efeito da percentagem e da orientação do CFRP

Na Figura 11 apresenta-se a relação ganho de resistência vs percentagem de reforço de CFRP relativamente às nove vigas ensaiadas (três percentagens de CFRP para cada uma das três orientações de reforço analisadas). Na Figura 12 apresenta-se o ganho de resistência proporcionado pelas nove soluções de reforço testadas, divididas em três grupos (função da orientação do CFRP), de forma a melhor poder ser analisado o efeito da percentagem de reforço. Na Figura 13 apresenta-se o ganho de resistência proporcionado pelas nove soluções de reforço testadas, divididas em três grupos (função da percentagem do CFRP), de forma a melhor poder ser analisado o efeito da orientação do reforço. O ganho de resistência refere-se à relação, em termos de percentagem, entre, a diferença das cargas máximas na rotura das vigas com e sem CFRP, e a carga máxima na rotura da viga sem CFRP. A percentagem de reforço ao corte com CFRP (ρ_f) foi determinada por intermédio de:

$$\rho_f = \frac{2 \cdot a_f \cdot b_f}{b_w \cdot s_f \cdot \sin \alpha} \times 100 \quad (\text{Equação 3})$$

em que a_f e b_f são as dimensões da secção transversal do laminado, b_w é a largura da alma da viga, s_f é o espaçamento dos laminados e α é a inclinação dos laminados relativamente ao eixo da viga.

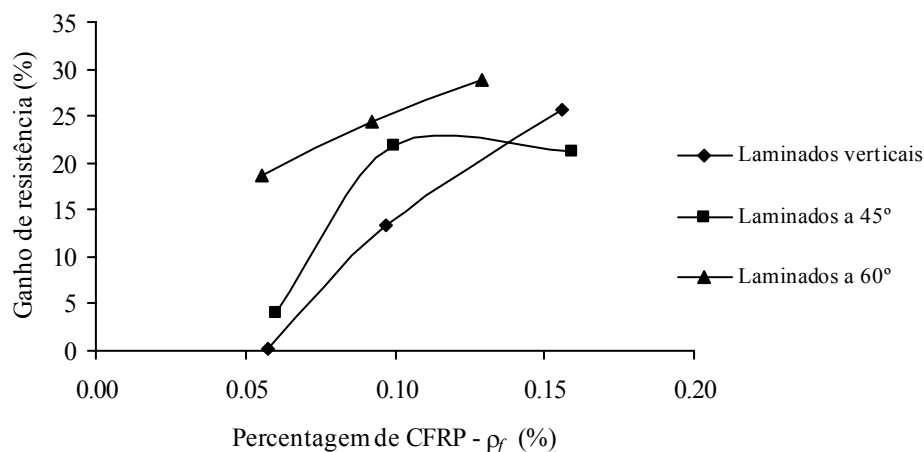


Figura 11 – Ganho de resistência vs percentagem de reforço de CFRP

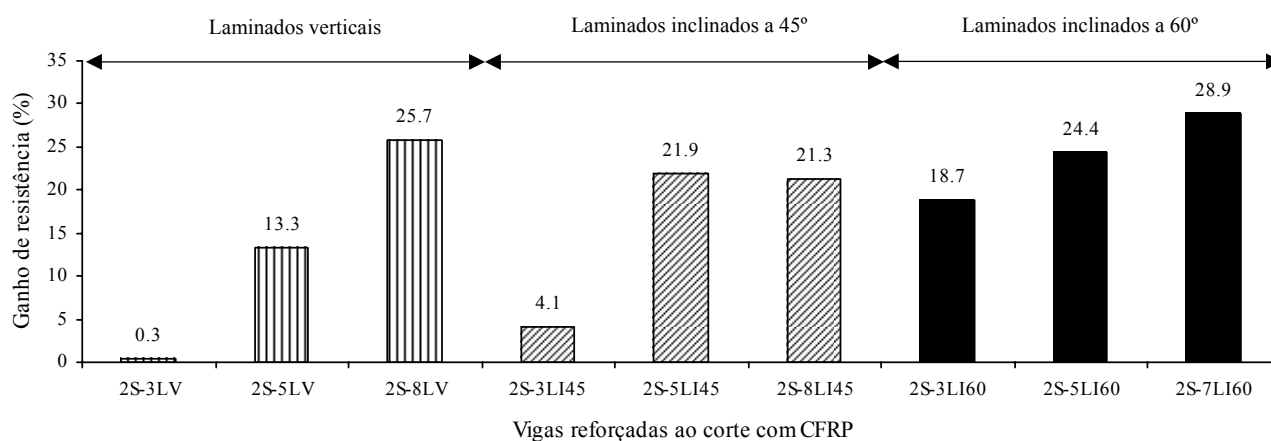


Figura 12 – Efeito da percentagem de CFRP no ganho de resistência

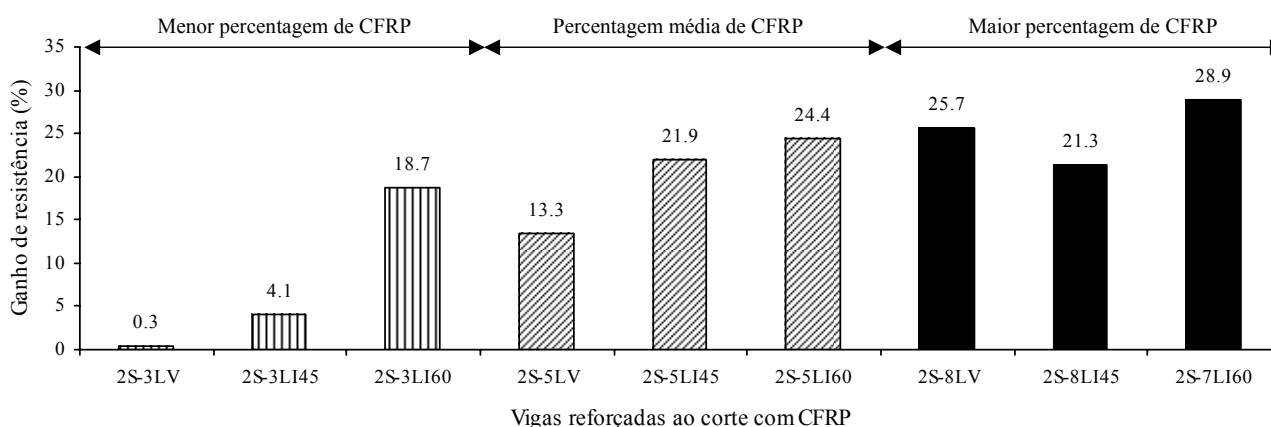


Figura 13 – Efeito da orientação do reforço na eficácia do reforço

De um modo geral é possível verificar que, independentemente da percentagem de CFRP, a solução com laminados inclinados a 60° foi mais eficaz que a solução de laminados verticais e a solução de laminados inclinados a 45°. Em termos da menor percentagem de CFRP aplicada ($\rho_f = 0.06\%$), o ganho de resistência da solução de reforço a 60° foi cerca de 4.6 vezes superior ao garantido pela solução de reforço a 45°. O

ganho de resistência obtido na viga 2S-3LI60 foi 1.4 vezes superior ao garantido pela solução de reforço na vertical da viga 2S-5LV ($\rho_f = 0.1\%$) e foi cerca de 87% do rendimento obtido nas vigas 2S-5LI45 ($\rho_f = 0.1\%$) e 2S-8LI45 ($\rho_f = 0.16\%$). A solução de laminados verticais utilizando a menor percentagem de CFRP não trouxe qualquer benefício em termos de capacidade máxima de carga. Também, para a referida percentagem de CFRP, mas aplicado a 45° , o ganho de resistência na rotura foi baixo (cerca de 4%).

Analisando os dados relativos às vigas, 2S-8LV, 2S-8LI45 e 2S-7LI60, verifica-se que o melhor desempenho da solução a 60° foi, também, bastante evidente no caso da percentagem máxima de CFRP utilizada. Com efeito, foi a solução de laminados inclinados a 60° , à qual correspondeu a menor percentagem máxima de CFRP aplicada ($\rho_f = 0.13\%$, enquanto para as outras duas soluções $\rho_f = 0.16\%$), que proporcionou o maior aumento da capacidade máxima de carga (29%).

Algo de semelhante se passou para a percentagem intermédia de CFRP utilizada. A solução de laminados a 60° ($\rho_f = 0.09\%$) proporcionou um acréscimo de capacidade máxima de carga de 24%, que foi superior à registada nas soluções de laminados verticais (13%) e laminados inclinados a 45° (22%), para as quais a percentagem de reforço ao corte (ρ_f) era de 0.1%. A carga máxima da viga 2S-5LI60 só foi ultrapassada pelas obtidas nas vigas 2S-8LV ($\rho_f = 0.16\%$) e 2S-7LI60 ($\rho_f = 0.13\%$).

A solução com laminados inclinados a 45° , com a excepção do caso referente à maior percentagem de CFRP aplicada ($\rho_f = 0.16\%$), conduziu a ganhos de resistência superiores aos atingidos pela solução de laminados verticais.

Os ganhos de resistência proporcionados pelos reforços de CFRP adoptados foram proporcionais à percentagem de CFRP (ρ_f), ou seja, o aumento da percentagem ρ_f garantiu um maior aumento da capacidade resistente máxima da viga reforçada. A única excepção foi o caso da viga 2S-8LI45 ($\rho_f = 0.16\%$) que teve uma capacidade de carga ligeiramente inferior à da viga 2S-5LI45 ($\rho_f = 0.1\%$). Para cada uma das orientações de reforço testadas, a evolução do ganho de resistência em função da percentagem de CFRP, que se encontra representada na Figura 11, pode ser dividida em dois patamares: o primeiro, correspondente às mais baixas percentagens de reforço aplicadas, e o segundo correspondente às mais altas percentagens de reforço aplicadas. Verifica-se que, em todas as orientações de reforço analisadas, a inclinação do primeiro patamar foi superior à do segundo, ou seja, os ganhos de resistência tem tendência a diminuir com a percentagem de CFRP.

A solução com laminados inclinados a 45° foi a mais sensível à variação da percentagem de CFRP. Com efeito, foi das orientações testadas a que proporcionou o maior incremento, em termos de ganho de resistência, na passagem da menor percentagem de CFRP ($\rho_f = 0.06\%$) para a percentagem intermédia ($\rho_f = 0.10\%$). Ao mesmo tempo, foi a única solução de reforço, em termos de orientação de CFRP, que não teve praticamente nenhuma variação ao passar da situação da percentagem intermédia de CFRP ($\rho_f = 0.10\%$) para a percentagem máxima de CFRP ($\rho_f = 0.16\%$). Por seu lado, a solução com laminados inclinados a 60° foi a que proporcionou uma evolução da relação ganho de resistência vs percentagem de CFRP mais próxima da linearidade.

4 Conclusões

Os ensaios descritos neste trabalho permitiram ampliar a base de dados com resultados experimentais referentes à aplicação da técnica de reforço ao corte de vigas de betão armado por intermédio da inserção de laminados de CFRP em finos entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais das vigas (NSM com laminados de CFRP).

Ao mesmo tempo foi possível avaliar o efeito de alguns dos parâmetros que influenciam o desempenho da referida técnica de reforço ao corte, nomeadamente a orientação e a percentagem de CFRP. Dos resultados obtidos no presente trabalho podem-se extrair as seguintes conclusões:

- a aplicação da técnica NSM com laminados de CFRP no reforço ao esforço transversal, independentemente da orientação e da percentagem de CFRP, permitiu aumentar significativamente a capacidade máxima de carga de vigas de betão armado de secção em T com rotura por corte. Exceptuando dois modelos que continham uma reduzida percentagem de CFRP, para as soluções de reforço de CFRP estudadas o referido aumento variou entre os 13% e os 29%;
- de um modo geral, a capacidade deformacional na rotura não foi sensível à presença do reforço ao corte de CFRP;
- em termos de orientação dos laminados, e independentemente da percentagem de CFRP, a solução com laminados inclinados a 60° foi mais eficaz que as soluções com laminados verticais e inclinados a 45°. Com a excepção do caso referente à maior percentagem de CFRP, a solução de laminados a 45° foi mais eficaz que a solução de laminados verticais;
- tendo por base os resultados obtidos na viga de referência (2S-R), verificou-se que os modelos reforçados ao corte com laminados a 60° apresentaram um aumento da carga máxima de 19%, 24% e 29%, respectivamente, para a percentagem mínima ($\rho_f = 0.06\%$), média ($\rho_f = 0.09\%$) e máxima ($\rho_f = 0.13\%$) de CFRP utilizada;
- tendo por base os resultados obtidos na viga de referência (2S-R), verificou-se que os modelos reforçados ao corte com laminados a 45° apresentaram um aumento da carga máxima de 4%, 22% e 21%, respectivamente, para a percentagem mínima ($\rho_f = 0.06\%$), média ($\rho_f = 0.1\%$) e máxima ($\rho_f = 0.16\%$) de CFRP utilizada;
- tendo por base os resultados obtidos na viga de referência (2S-R), verificou-se que os modelos reforçados ao corte com laminados verticais apresentaram um aumento da carga máxima de 0%, 13% e 26%, respectivamente, para a percentagem mínima ($\rho_f = 0.06\%$), média ($\rho_f = 0.1\%$) e máxima ($\rho_f = 0.16\%$) de CFRP utilizada;
- os modelos reforçados com a maior percentagem de CFRP apresentaram uma carga máxima 99%, 93% e 97% da verificada na viga 6S-R para as soluções de laminados a 60°, 45° e 90°, respectivamente. A viga 6S-R (seis estribos) era o modelo em betão armado “equivalente” aos modelos reforçados com a quantidade máxima de CFRP;
- em termos de carga de serviço, as vigas reforçadas ao corte com laminados de CFRP inclinados a 60° foram as que apresentaram maior capacidade de carga. Os acréscimos médios de carga de serviço proporcionados pelo reforço de CFRP para as soluções de laminados inclinados a 60°, 45° e a 90° foram de 24%, 14% e 15%, respectivamente;
- de um modo geral verificou-se que o aumento da percentagem de CFRP aplicada foi acompanhado por um aumento da capacidade resistente máxima da viga. No entanto esse aumento não foi proporcional, verificando-se que a solução a 60° foi a que se aproximou mais da referida proporcionalidade. Este facto pode indiciar a existência de um “ponto óptimo” que optimiza a relação ganho de resistência/percentagem de CFRP.

5 Agradecimentos

Os autores do presente trabalho expressam o seu agradecimento à empresa “Empreiteiros Casais” pela colaboração prestada na construção das vigas e na aplicação dos reforços de CFRP. Os agradecimentos são extendidos à S&P Reinforcement pelo fornecimento dos laminados e mantas de CFRP, à Unibetão (Braga) pelo fornecimento do betão e à Degussa Construction Chemicals Portugal pelo fornecimento do adesivo e das

resinas. Um agradecimento especial ao Miguel Freitas, finalista da licenciatura em Engenharia Civil da Universidade do Minho, pela colaboração na campanha de ensaios levada a cabo para a realização deste trabalho. Os autores manifestam também os seus agradecimentos ao apoio prestado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) no projecto POCTI/ECM/59033/2004.

6 Referências

BOUSSELHAM A.; CHAALLAL, O.. **Shear Strengthening Reinforced Concrete Beams with Fiber-Reinforced Polymer: Assessment of Influencing Parameters and Required Research**. ACI Structural Journal, Vol.101, Nº2, March-April, pp.219-227, 2004.

DEGUSSA CONSTRUCTION CHEMICALS PORTUGAL. **Fichas técnicas MBrace Resin 50, MBrace Resin 55 e MBrace Resin 220**. Maio, 2003.

DE LORENZIS, L.. **Strengthening of RC Structures with Near-Surface Mounted FRP rods**. PhD Thesis, Universita' Degli Studi di Lecce, Italy, May, 289 pp, 2002.

DIAS, S.; BARROS, J.. **Materiais compósitos de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado**. Relatório Técnico 04-DEC/E-03, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Fevereiro, 74 pp, 2004-a.

DIAS, S.; BARROS, J.. **CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado: investigação experimental e modelos analíticos**. Relatório Técnico 04-DEC/E-08, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Maio, 109 pp, 2004.

EN 10002. **Metallic materials. Tensile testing. Part 1: Method of test (at ambient temperature)** . 35 pp., 1990.

ISO 527-5. **Plastics – Determination of tensile properties – Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites**. International Organization for Standardization, Genève, Switzerland, 9 pp., 1997.

KHALIFA, A.. **Shear Performance of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Advanced Composites**. PhD. Thesis, Structural Engineering Department, Alexandria University, Egypt, 1999.

NP-ENV 206. **Betão - Comportamento, produção, colocação e critérios de conformidade**. Norma Portuguesa, IPQ, Outubro, 1993.

S&P REINFORCEMENT. **Design guide line for S&P FRP systems**. S&P Clever Reinforcement Company, Switzerland, 69 pp, 2002.